

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА НА СТЕНКЕ  
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ВДУВЕ В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТРУБЫ  
АРГОНА И ГЕЛИЯ

Э. П. Волчков, Е. И. Синайко

(Новосибирск)

Для защиты поверхностей от воздействия высокотемпературных и химически агрессивных потоков газа может применяться заградительное охлаждение. В этом случае охлаждающий газ (жидкость) подается через щель или пористый участок в пограничный слой на поверхности.

В работах по заградительному охлаждению в основном исследовался вдув однородного газа (воздуха в воздух). И только в некоторых работах [1-4] рассматривался вдув инородного газа на адиабатической стенке.

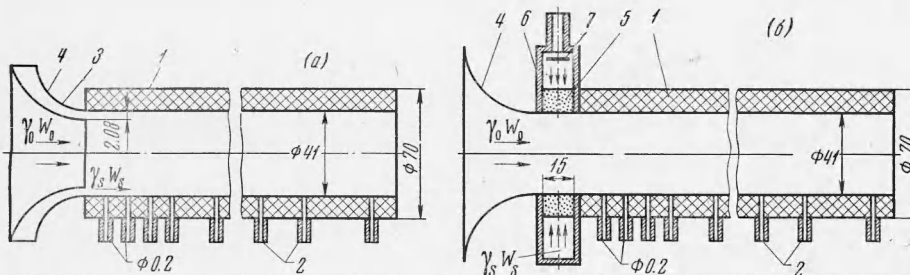
Как известно, при пористом охлаждении более эффективным является вдув газа с меньшим молекулярным весом [5].

В одной же из последних работ по заградительному охлаждению [4] показано, что эффективность вдува гелия на адиабатической стенке незначительно выше эффективности вдува фреона-12 (при одинаковых расходах охладителя весовая концентрация вдуваемой компоненты на стенке несколько больше для газов с меньшим молекулярным весом). При одинаковой же величине отношения  $w = \text{const}$  скоростей вдува через щель  $W_s$  и основного потока  $W_0$  весовая концентрация охладителя на стенке выше для газа с большим молекулярным весом.

В работе [6] показано существенное влияние поперечной кривизны поверхности на интенсивность теплообмена в затопленной ( $w \rightarrow \infty$ ) пристенной струе при продольном обтекании внешней поверхности цилиндра.

Целью данной работы является определение эффективности локального вдува аргона и гелия в начальном участке трубы.

Эксперименты проводились на установке, подробное описание которой приведено в работе [7]. В этом случае использовались специальные рабочие участки, принципиальная схема которых представлена на фиг. 1. Измерения концентрации газа на стенке производились при вдуве аргона и гелия через тангенциальную щель (фиг. 1, а) и при вдуве гелия через начальный пористый участок (фиг. 1, б). При вдуве аргона и гелия через тангенциальную щель (фиг. 1, а) рабочий участок состоял из двух соососно установленных профилированных сопел 3 и 4, обеспечивающих равномерные профили скоростей воздуха и вдуваемого газа на входе в канал 1.



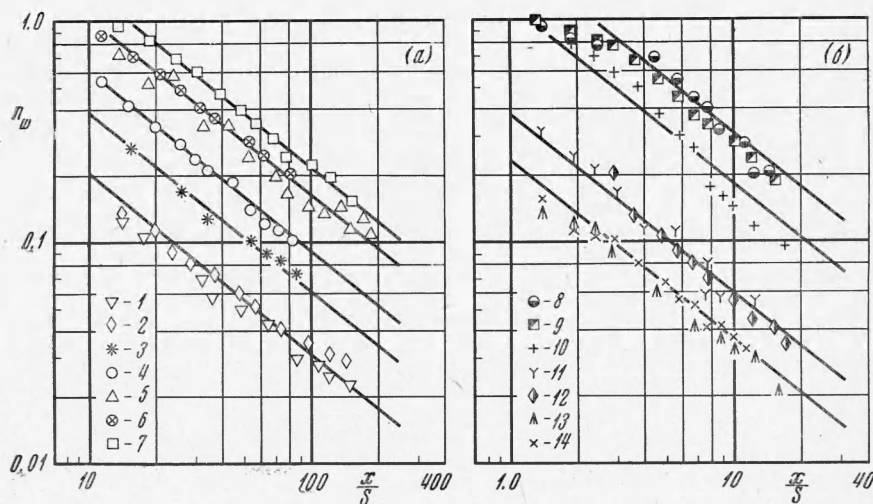
Фиг. 1

Основной поток — воздух — подавался в канал из воздушной системы через внутреннее сопло 3, вдуваемый газ (аргон или гелий) — из баллонов через щель, образованную соплами 3 и 4. Диаметр выходного сечения сопла 4 был равен 41 мм. Ширина щели  $s$  была во всех опытах постоянной и равнялась 2.08 мм. Толщина выходной кромки сопла 3 была не более 0.3 мм. Основной поток и вдуваемый газ подавались в канал с одинаковой температурой  $t_0 = t_s = 20^\circ \text{C}$ . Из рабочего канала газ выбрасывался в атмосферу. Расход воздуха измерялся мерной шайбой и в опытах составлял  $150 \div 200 \text{ г/сек}$ . Расход гелия ( $0.49 \div 3.34 \text{ г/сек}$ ) и аргона ( $6 \div 43 \text{ г/сек}$ ) измерялся с помощью ротаметров РС-5 и РС-7. Цилиндрический канал с внутренним диаметром 41 мм и длиной 400 мм был выполнен из эбонита. По длине канала в стенке было просверлено 16 отверстий диаметром 0.2 мм для отбора газовых проб на анализ. Они были сделаны по спиральной линии, чтобы исключить влияние предыдущего отбора на последующие.

При вдуве гелия через пористую вставку использовался рабочий участок, схема которого представлена на фиг. 1, б. Внутреннее сопло 3 убиралось и воздух подавался

в канал через сопло 4. Гелий подавался через цилиндрическую пористую вставку 5, выполненную из графита ПГ-50; его пористость составляла 50%; при этом в коллекторе 6 помещался отражатель 7.

Измерения концентрации производились с помощью лабораторного хроматографа ГСТЛ, который имеет мостовую измерительную схему. Одно плечо измерительного



Фиг. 2

моста находится в камере, через которую пропускается исследуемая смесь газа. Показания прибора определяются теплопроводностью газовой смеси, которая зависит от концентрации отдельных компонентов. Прибор тарировался объемным методом. Для отбора газовых проб на стенке к штуцерам 2 присоединялись резиновые шланги, которые перед опытом заполнялись дистиллированной водой и перекрывались зажимами. На другом конце в шланги были вставлены инъекционные иглы, через которые при отборе газовых проб выдавливалась вода. После того как устанавливался заданный режим, открывались одновременно все зажимы и производился отбор газовых проб. Объем пробы составлял 30 мл.

При большой скорости отбора пробы газ будет отсасываться не только с обтекаемой поверхности, но и из ядра пограничного слоя, что может привести к существенной погрешности. Поэтому сначала было исследовано влияние времени отбора пробы на точность измерения концентрации гелия на стенке. Эти опыты были проведены на одном режиме целевого вдува гелия. Отношение скорости в щели к скорости основного потока  $w = 0.1$  сохранялось постоянным, а время отбора пробы изменялось. Отборы газа производились из двух точек на стенке, расположенных на расстоянии 30 и 60 мм от среза щели. Как показали эти опыты, при изменении времени отбора от 14 до 110 сек, результаты измерения концентрации газа на стенке остаются постоянными в рассматриваемых условиях. Это можно объяснить тем, что градиент концентрации на непроницаемой стенке равен нулю, т. е.  $\partial k_i / \partial y = 0$ .

В последующих экспериментах отбор газовых проб производился в течение одной минуты. Основные режимные параметры проведенных опытов приведены в таблице.

На фиг. 2 представлены результаты измерения объемной концентрации гелия (а) и аргона (б) на стенке трубы при вдуве через тангенциальную щель; нумерация точек на этой фигуре, а также на фиг. 3 и фиг. 5 соответствует опытам, основные параметры которых приведены в таблице.

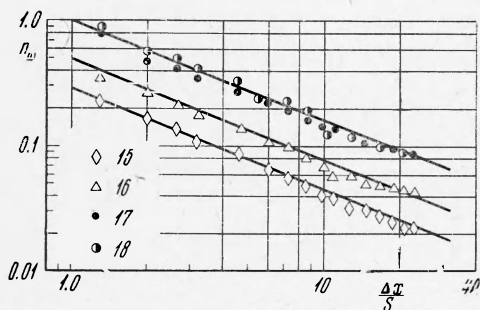
В этих опытах скорость основного потока составляла  $120 \div 160$  м/сек, при этом отношение скорости в щели к скорости основного потока изменялось в пределах  $0.1 \leq w \leq 0.7$ . Как видно из графика, с увеличением расстояния  $x$  от щели, объемная концентрация вдуваемого газа на стенке  $n_w$  падает по степенному закону.

На фиг. 3 приводятся результаты измерений объемных концентраций гелия на стенке трубы при вдуве его через пористый участок шириной  $s$  (принята за характерный размер, в долях которой выражены координаты). В этом случае продольная координата  $x = \Delta x$  отсчитывается от задней кромки пористой вставки. Изменение объемной концентрации по длине стенки и в этом случае подчиняется степенной зависимости  $n_w \sim (\Delta x)^{-0.8}$ .

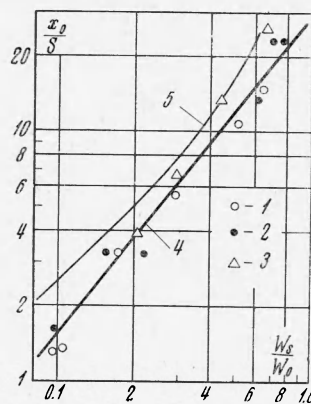
В экспериментах со вдувом через тангенциальную щель гелия при  $w = 0.5$  и аргона при  $w = 0.7$  четко видно наличие начального участка, где концентрация вду-

ваемого газа на стенке равна единице. В опытах с меньшими вдувами длина этого участка определялась, как и в работе [8], экстраполяцией полученной зависимости в точку, где концентрация вдуваемого газа на стенке будет равна единице.

Длина начального участка в зависимости от относительной скорости вдува  $w$  приведена на фиг. 4. Экспериментальные результаты, полученные при тангенциальном



Фиг. 3



Фиг. 4

вдуве гелия (точки 1) и аргона (точки 2) в воздух, можно аппроксимировать простой зависимостью

$$x_0 = 28 w^{1.25} \quad (1)$$

На этой же фигуре приводится длина начального участка, определенная в работе Себана [8] при вдуве воздуха в воздух (точки 3) на пластине, кривая 4 соответствует

Точки	$W_0, \frac{м}{сек}$	$w$	$R_s \cdot 10^{-3}$	Точки	$W_0, \frac{м}{сек}$	$w$	$R_s \cdot 10^{-3}$
тангенциальный вдув He				тангенциальный вдув Ar			
1	123.0	0.096	0.222	8	133.0	0.787	19.4
2	119.0	0.105	0.227	9	128.0	0.705	17.0
3	128.0	0.174	0.425	10	128.0	0.62	14.65
4	118.5	0.29	0.653	11	131.0	0.223	5.42
5	161.0	0.492	1.5	12	129.0	0.153	5.42
6	153.0	0.51	1.48	13	146.8	0.098	2.72
7	122.0	0.656	1.52	14	146.8	0.098	2.72

Вдув He через пористый участок

15	120.6	0.0153	0.254	17	120.6	0.0448	0.743
16	120.0	0.0252	0.416	18	121.6	0.0558	0.93

расчету по формуле (1), а кривая 5 — по формуле Г. Н. Абрамовича [9] для свободной плоской струи при  $w < 1$

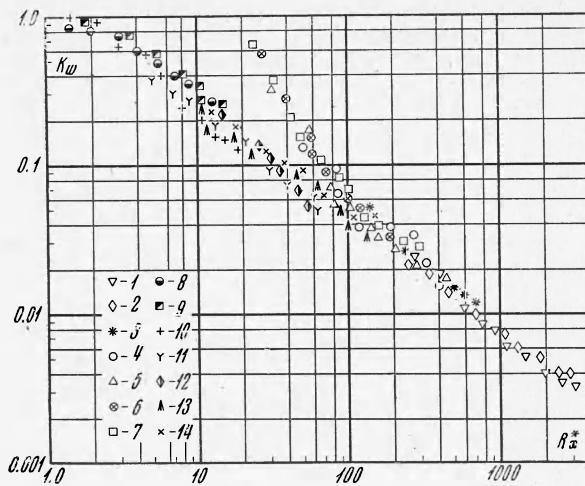
$$x_0 = \frac{W_0 + W_s}{W_0 - W_s} \left[ 0.112 + 0.036 \frac{W_0}{W_s} \right]^{-1} \quad (2)$$

Видно, что длина начального участка при вдуве через щель гелия и аргона практически совпадает с длиной начального участка при вдуве воздуха в воздух.

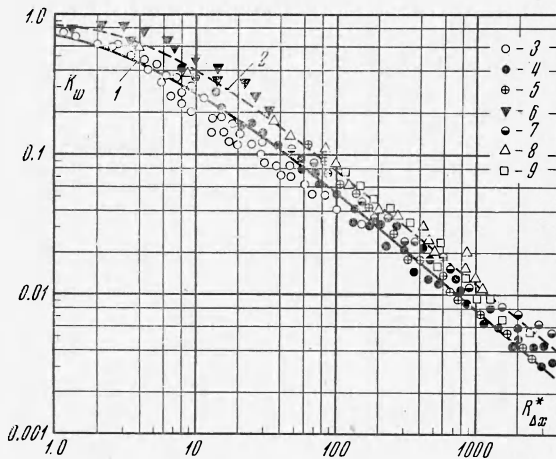
В большинстве работ по пленочному охлаждению [1,4,8] для обобщения опытных данных вводится безразмерный комплекс

$$\frac{x}{ms} \left( R_s \frac{\mu_0}{\mu_s} \right)^{-0.25} = \frac{R_x}{R_s^{1.25}} \left( \frac{\mu_0}{\mu_s} \right)^{1.25} = R_x^* \quad (3)$$

Если провести обработку по объемным концентрациям, то получим большое расслоение опытных данных в зависимости от молекулярного веса



Фиг. 5



Фиг. 6

в котором число Рейнольдса определено с учетом начального участка ( $\Delta x = x - x_0$ ). Эта фигура дает сводку опытных данных по эффективности заградительного охлаждения: кривые 1 и 2 построены по формулам (6) и (7), точки 3 и 4 — тангенциальный вдув аргона и гелия, точки 5 — вдув гелия через пористый участок — получены в результате опытов авторов; остальные точки взяты из работы [4] и соответствуют тангенциальному вдуву фреона-12 в воздух — точки 6, водорода в воздух — точки 7, гелия в воздух — точки 8; точки 9 дают результаты измерений концентрации гелия на стенке при вдуве его через пористый участок [2]. В этом случае продольная координата  $\Delta x$  отсчитывается от задней кромки пористой секции. Однако следует иметь в виду, что при интенсивных вдувах (сверхкритических) за пористой секцией может быть участок, на котором концентрация вдуваемой компоненты  $K_w = 1$ .

В такой обработке опытные данные по тангенциальному вдуву аргона и гелия хорошо согласуются между собой и с результатами, полученными при вдуве гелия через пористый участок. Полученные результаты можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$K_w = [1 + 0.4R_{\Delta x}^*]^{-0.8} \quad (6)$$

На этом же графике приводятся опытные данные других авторов по измерению концентрации водорода, гелия и фреона-12 за тангенциальной щелью [4] и гелия за пористой секцией [2]. Эти исследования проводились в пограничном слое на плоской пластине. Рассматриваются только опыты, в которых скорость вдуваемого через щель

вдуваемого газа. На фиг. 5 экспериментальные результаты по вдуву аргона и гелия через тангенциальную щель представлены в виде зависимости весовой концентрации вдуваемого газа на стенке от указанного комплекса  $R_{\Delta x}^*$ . Основные параметры опытов приведены в таблице.

При этом используется следующее соотношение между весовой и объемной концентрациями вдуваемой компоненты

$$K_w = \frac{n_w M_s}{M_0 - n_w (M_0 - M_s)} \quad (4)$$

где  $M_0$  и  $M_s$  — молекулярные веса основного потока и вдуваемого газа. Как видно из графика, при одинаковых расходах гелия и аргона вблизи щели более эффективным является вдув газа с меньшим молекулярным весом. На большом расстоянии от щели результаты опытов асимптотически сближаются и выходят на одну кривую. Это объясняется тем, что при одинаковых расходах вдуваемого газа относительная скорость в щели  $w$  будет выше у более легкого газа. Как следует из фиг. 4, при этом будет больше и длина начального участка, где  $K_w = 1$ .

На фиг. 6 эти же опытные данные построены в зависимости от комплекса

$$R_{\Delta x}^* = \frac{R_{\Delta x}}{R_c^{1.25}} \left( \frac{\mu_0}{\mu_s} \right)^{1.25} \quad (5)$$

газа ниже скорости основного потока  $w < 1$ . Это условие соответствует физической модели, предложенной в работах [3, 5, 10] для расчета эффективности газовой завесы.

На фиг. 6 дается также расчет эффективности газовой завесы по формуле, полученной в работе [5]

$$\theta = \frac{(K_i)_0 - (K_i)_w}{(K_i)_0 - (K_i)_s} = [1 + 0.24R_{\Delta x}^*]^{-0.5} \quad (7)$$

Здесь  $(K_i)_0$ ,  $(K_i)_s$  и  $(K_i)_w$  — весовые концентрации  $i$ -й компоненты в основном потоке, в щели и на стенке. Если концентрация ддуваемого газа в основном потоке равна нулю  $(K_i)_0 = 0$ , то его концентрация на стенке и определяет эффективность заградительного охлаждения  $\theta = K_w$ . Все опытные данные в основном располагаются между двумя расчетными кривыми.

Результаты данной работы, полученные в начальном участке трубы при  $x/d < 10$  и  $s/d = 0.0508$ , лежат несколько ниже результатов, полученных на плоской пластине. Возможно с увеличением отношения высоты щели  $s$  к диаметру трубы  $d$  влияние поперечной кривизны поверхности будет расти.

В опытных данных, приведенных на фиг 6, энтальпийный фактор в сечении щели  $i_s/i_0$  изменялся от 0.51 при вдуве аргона до 15 при вдуве водорода. Однако они все обобщаются без учета фактора неизотермичности, что подтверждает выводы, сделанные ранее в работе [1] о слабом влиянии неизотермичности на эффективность заградительного охлаждения адиабатической стенки.

Поступила 13 III 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stollery J. L., El-Enwany A. A. M. A note on the use of a boundary — layer model for correlating film-cooling data. Internat. J. Heat Mass Trans., 1965, vol. 8, No. 1, pp. 55, 56.
2. Goldstein R. J., Rask R. B., Eckert E. R. G. Film cooling with helium injection into on incompressible air flow. Internat. J. Heat Mass Trans., 1966, vol. 9, No. 12, pp. 1341—1350.
3. Волчков Э. П., Зауличный Е. Г., Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Заградительное охлаждение при подаче инородного вещества в турбулентный пограничный слой. ПМТФ, 1967, № 2.
4. Burns W. K., Stollery J. L. The influence of foreign gas injection and slot geometry on film cooling effectiveness. Internat. J. Heat Mass Trans., 1969, vol. 12, No. 8, pp. 935—951.
5. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1964.
6. Manian V. S., McDonald T. W., Besant R. W. Heat transfer measurements in cylindrical wall jets. Internat. J. Heat Mass Trans., 1969, vol. 12, No. 6, pp. 673—679.
7. Леонтьев А. И., Волчков Э. П., Зауличный Е. Г., Синайко Е. И. Экспериментальное определение скорости уноса графита в условиях существенной неизотермичности. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, No. 2.
8. Seban R. A. Heat transfer and effectiveness for a turbulent boundary layer with tangential fluid injection. Trans. ASME, 1960, Ser. C, vol. 82, No. 4.
9. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
10. Волчков Э. П., Левченко В. Я. Эффективность газовой завесы в турбулентном пограничном слое. ПМТФ, 1965, № 5.
11. Волчков Э. П., Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. О влиянии сжимаемости и неизотермичности газа на эффективность заградительного охлаждения при турбулентном пограничном слое. ПМТФ, 1966, № 4.